第一言語処理と第二言語処理における脳活性状態の違い
―日本語と英語のリスニングにおいて―

大石晴美
木下徹

1. はじめに

第一言語と第二言語処理における脳の活性状態の研究は、比較的以前から存在した脳波計に加えて、PET(陽電子放射断層撮影法)、fMRI(機能的磁気共鳴映像法)、fNIRS（機能的近赤外分光法）、MEG（脳磁気図）などの近年の技術開発とともに急速に進んできた。これらの装置を人間の言語情報の関係分野に応用した研究では、これまで主に脳内で言語を処理する部位を特定することに注意が向けられてきた。たとえば、酒井（2002）は、左脳のブローカ野、ウェルニッケ野、角回・縁上回の機能が相互に補いあって、言語を処理しているとし、同じく酒井(2006)は、fMRI を使用し、ブローカ野が文法を処理する特徴的部位であると示唆している。また、Crinion *et al.*(2006)は、バイリンガルでは、脳内の「左尾状核」が、二つの言語を切り替える役割をしていると報告し、この部位が、「バイリンガル脳(スイッチ)（括弧内は筆者挿入）」であるとしている。

このような脳科学の進展を、第二言語習得論、外国語教育への応用という点で見てみると、もともと、第二言語習得、外国語教育の分野の従来の研究手法としては、言語処理メカニズムを解明するために、両耳異同刺激法、反応時間、シンクアラウド法、インタビューやアンケート方式等が実施されていた。もちろん、このような手法は今でも広く行われている有効な方法であるが、脳科学、とくに脳の高次機能に関する可視化技術の発達にともない、80 年代後半から、90 年代にかけて、言語情報の処理中を含めた、広い意味での言語習得における脳機能そのものを、より直接的な研究の対象とする必要性が主張されるようになった。そのような主張、および、実践の例として、例えば、Schumann、*et al.*（2004）は、以前からの主張を再度確認する形で、第二言語習得の理論研究における脳科学からの検証の重要性を改めて示唆している。また、Jacobs and

Schumann（1992）は、第二言語習得の分野で、最も早い例の1つとして、PET を使用した実証研究を試みている。これらの研究をはじめ、冒頭で述べたような技術開発の進展とともに、脳科学からのアプローチがより注目され、各種の研究が進んできている。1990年代の終わりから2008年の現在まで、第二言語習得の分野で、MRI を使用した研究だけでも主要誌を探ると20を超える論考が公刊されている。その中では、例えば、バイリンガルによる、大脳皮質での意味情報処理のプロセスを扱った Illes *et al.* (1999)は、英語・スペイン語の上級二言語話者の場合、脳の賦活部位については言語間に有意な差はみられなかったと報告している。また、Perani *et al.* (2003)は、超早期（3歳以下）に第二言語に接触し、それ以来、2言語を使用してきているスペイン語・カタロニア語のバイリンガルにおける言語習得への年齢の効果と習得順序の影響を検証している。それによると、このような早期バイリンガルでも、語彙想起課題においては、先に習得された言語を使用した方が、脳の賦活の度合は小さくて遂行できるとしている。さらに、Perani and Abutalebi (2005)は、MRI により、それまで長らく想定されていた、バイリンガルにおける第一言語と第二言語は、それぞれ大脳の異なった領域において表象されているという仮説は支持されず、むしろ、両言語は同じ脳神経的装置（device）によって、プロセスされていることを、示唆する証左を得たとしている。

ところで、先述したような脳科学の各種の手法の内では、脳神経活動自体から発する信号を測定するものと、神経活動の結果生じた、大脳各部位の血流量の変化を測定し、それによって、脳神経活動を間接的に推定するものの2つのタイプが見られる。PET、fMRI、fNIRS は、後者に属するタイプである。このうち、後者のタイプに関しては、実は、記録されてくる血流量の変化は大脳の活動のうち、実際には、何を示唆しているのかという点について、未だに有る程度の議論が続いている。

しかしながら、この点に関しては、第二節の方法論の中でも論じるように、本稿では、血流は神経活動を反映しているという前提に基づき、その上で、学習者の脳血流量の増加と注意量の関係に注目した。この点に関しては、従来の研究で、脳血流量は、注意量と正の相関関係があるとされ、注意資源がより多く消費されるほど、脳血流量は増加すると想定されている（Posner and Carr、1992）。

一方、注意が、学習においてどのような役割を果たすのかという問題については、Schmidt(1999)および Simard and Wong (2001) は、注意は、学習時においては、不可欠なものであり、 かつ、使用可能な注意の量には限界があるため、選択的に課題に向けられなければならないとしている。また、関連して、McLaughlin *et al.* (1983)の

attention-processing model では、言語習得が進むにつれ、意識的なコントロール、すなわち、注意資源をより多く必要とする処理から無意識的なオートマティック処理に移行していくとしている。

学習時には、注意をどれだけその時点で遂行している課題に向けることが可能なのであろうか。逆に、どれだけの注意を課題に向けることが、学習を促進させるのであろうか。さらに言えば、課題に注意がどれだけ向けられるかは、学習者にとっての難易度が影響するのではないだろうか。この点について、脳科学の応用の一例として、大石（2006）では、日本人英語学習者を対象に、リスニングとリーディングにおいて、学習者にとって、難易度の高い課題と低い課題を提示したときの脳活性状態を比較した。結果として、難易度の高い課題を遂行しているときの方が低い課題遂行時よりも脳活性度は高かったと報告している。

なお、課題の難易度を考察するときは、与えられたパラグラフや、リスニングにおけるパッセージの、語彙、統語、発音の速度や明瞭性といった、純粋に言語的な側面だけでなく、その内容に関する、学習者の背景知識の有無、もしくはその大小ということがらも、当然関係すると思われる。この点についても、これまで、種々の先行研究が報告されてきているが、その中で、例えば、Carrell（1983)は、読み手の背景知識とテキストの相互作用が効果的であるとしている。また、関連して、スキーマ理論（Rumelhart、1980）では、人間の脳内には、それぞれの経験や知識が、構造的に蓄積され記憶されていて、その構造的知識が、記憶を呼び出したり、判断したり、理解したりすることに関わっており、読解、聴解とも、そのようなスキーマを活性化させて受け取るメッセージを理解しているとしている。

このような状況の中で、本稿では、学習者に第一言語と第二言語のリスニング課題を提示し、インタビューによるリスニングプロセスや背景知識の調査とともに、fNIRS を用いて脳血流量を測定し、学習者の脳活性状態の言語別の変化を報告する。一方、課題の難易度という点では、通常、内容のレベルや背景知識に顕著な差がない限り、どの学習者にとっても第一言語の課題より第二言語の課題の方が高いと推定される。一般的に、難易度が高いほど、注意量は多く必要であると思われるため、仮説としては、第一言語の課題遂行時より第二言語課題遂行時の方が、脳血流量の増加は多いと推測される。

2.　実験方法

本研究での実験参加者は、日本人の英語学習者とアメリカ人日本語学習である。それぞれの参加者にとっての第一言語と第二言語で、ある時事問題に関するニュースを聞いてもらい、脳血流量の増加量を比較した。また、インタビューで、課題として与えたニュースの内容を知っていたかどうかについて尋ね、背景知識の有無を判断した。仮説としては、先述したように、第一言語より第二言語を処理するときの方が、脳血流の増加量が多い、つまり、第二言語を処理するときの方が第一言語を処理するときより多くの注意量を必要とすると想定する。ただし、背景知識に差がある場合には、必ずしもこの限りではないと推測される。

2.1.　実験参加者

実験参加者の詳細は次の通りである。実験参加者の第二言語能力（日本人の英語能力、アメリカ人の日本語能力）に関しては、英語の熟達度は、TOEFL（従来型）の得点で、日本語能力は、日本語能力検定試験の得点である。なお、脳血流の測定の際に関連する言語野の半球に関する情報として、いずれの参加者も右利き（言語野は左半球に存在する）であることを確認した。

(1)　実験参加者 A
　　日本人英語学習者、20 代　大学生、TOEFL　480 点
(2)　実験参加者 B
　　日本人英語学習者　　30 代　社会人、TOEFL　 570 点
(3)　実験参加者 C　大学院生、英語母語話者　20 代
　　日本語能力検定試験 1 級

2.2.　実験課題

実験課題（リスニング）は、次の通りである。

(1)　英語課題　CNNニュース　30秒
(2)　日本語課題　NHKニュース　30秒

2.3. 脳血流量測定装置

脳血流量の測定には、fNIRSとして光トポグラフィ(ETG−100, 日立メディコ)を使用した。光トポグラフィは元々は商品名であったが、現在では、fNIRS の別名として使用されている。fNIRSは、同種のfMRIやPET、MEG等に比較して、特別なシールドルーム等を必要としない、簡易的な脳血流量測定装置である。本装置は、頭部に装着した投光器の先端から、頭皮に微弱な近赤外光を照射し、30mm 程度離れた受光器で、大脳皮質を経由して来る光を検出する。検出される光の強度によって、血液中のヘモグロビン濃度を算出する。検出光は、生体組織からの散乱光・反射光を合わせたもので頭皮からおよそ25mm から30mm まで浸透し、大脳皮質の脳活性状態を反映するとされている(小泉、2000)。

脳の情報処理においては、小泉(1997)は、神経活動が担う情報伝達と神経活動を支えるエネルギー供給系の二つが密接に関係していると指摘している。すなわち、神経活動が活発になると、脳内周辺部位の血管が拡張し、エネルギー源となる酸素を供給する調整機構が働く。そして、活動している部位の近傍では血流量が増え、ヘモグロビンの濃度が高くなると仮定されている。一般に、このような神経活動と脳血流反応の関係は、ニューロバスキュラーカップリング(neuro - vascular coupling)と呼ばれている。fMRI、PET、fNRSなどの脳機能測定装置の値は、ニューロバスキュラーカップリングがあるとする仮定に基づいて、脳内のヘモグロビン濃度の増加を捉えている。従って、この指標は、実際は、情報を処理している神経活動そのものの反応ではないが、間接的な脳機能の測定指標の一つと見なされている。

2.4. 実験手法

実験手順と指示は次の通りである。

1) 実験参加者に実験の手順を説明し、実験データは、研究目的に使用することの承諾を得た。
2) TOEFL の得点を取得していることを確認した。
3) 脳血流量測定のために、光トポグラフィの計測プローブを、実験参加者の言語野(聴覚野、角回・縁上回、ウェルニッケ野)を含む、左側頭葉の頭皮に装着した。
4) 参加者への、実験手順についての説明は次の通りである。

① 課題提示前30秒の安静時間をとる。
② リスニング課題を提示する（30秒間）。
③ 課題提示後30秒の安静時間をとる。
④ 理解した内容を口頭で報告する。
⑤ 課題提示中は、内容理解に集中するようを伝えた。
⑥ 課題終了後、ストラテジー、理解方法、情報処理過程について、インタビューを実施した。

3. 実験結果

3.1. 分析方法

光トポグラフィにより計測された脳血流量の相対値は、ヘモグロビン濃度で示される。課題提示中30秒間のデータをマハラノビス処理によって、分散に対する相対値として扱うことにより正規化をした。これにより、変化量のレンジが異なるヘモグロビン濃度データの変化の割合を同一尺度で比較することができる（光トポグラフィ取扱説明書参照）。

光トポグラフィで計測したヘモグロビンの変化を、リスニング課題を提示した脳機能の変化であることを効果的に抽出するためによく用いられる方法の一つに差分法（subtraction）がある。差分法は、二つの課題で得られたデータを引き算する方法である。本研究では、リスニング課題遂行時のヘモグロビンの値から課題前の安静時のヘモグロビンの値を引き算して、リスニング課題遂行時のヘモグロビンの変化量を求めた。

統計分析については、実験の制約から、実験参加者数が、極端に少ないため、最近、行動科学や医学、教育等の臨床の場を中心に注目されてきているシングルケース・スタディのアプローチ（cf. e.g. 岩本・川俣、1990）を援用することとした。通常の、多標本実験計画法と異なり、シングルケース・スタディでは、実験参加者は普通1名であり、同一の参加者に対して、実験条件を変えて、測定を比較的多く繰り返すことで、通常の実験デザインで用いられるような、多くの実験参加者に対して比較的少数の測定を施すやり方に対する代替的アプローチをとるものである。このようなアプローチに基づき、本研究では、参加者各々のウェルニケ野とその周辺と思われる3つのチャンネルから、それぞれ、30秒のレストと、課題遂行時の間、おおよそ、各0.1秒毎に1個の割合で測定さ

れた血流量の変化値を各チャンネル毎で平均したものを、実験者内のL1とL2で比較して、平均の差を検定した。なお、平均の差に関しては、正規性等の前提を必要としないように、関連のある2群の差の検定としてウィルコクソン符号付順位和両側検定を用いた。ただ、このような解析方法については、シングルケース・スタディの手法の観点からみても必ずしも疑義がないとは言い切れず、また、例えば、岩本・川俣(1990:40-43)に指摘されているように、シングルケースに焦点を当てるという主旨からは、シングルケースから得た多数のデータポイントを平均化することには、個々のデータに焦点をあてるというメリットが失われてしまいかねないといった指摘もされている。従って、以後の分析、考察においては、記述統計を主な根拠とし、検定結果は副次的に取り扱うこととしたい。

3.2. 結果

表1. 日本語と英語のリスニング時の脳血流相対値

実験参加者	A(日本人)	B(日本人)	C(アメリカ人)
日本語	3.75	7.21	70.85
英語	40.01	60.11	11.90

注)各セルの数値は血流の個人内の相対的変化量を表す。
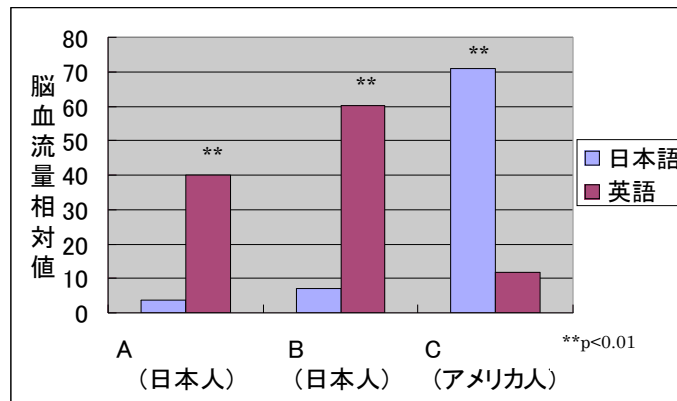
図1. 日本語と英語のリスニング時の脳血流量相対値

表1.および図1.より、学習者にとって、第一言語（日本人が日本語、アメリカ人が英語）のリスニングをした場合より、第二言語（日本人が英語、アメリカ人が日本語）のリスニングをした場合の方が、脳血流の増加量が多い。

さらに、図2の「左言語野周辺の光トポグラフィ画像」より、学習者にとっての第二言語でリスニングした場合（実験参加者 A、B にとっての英語、実験参加者 C にとっての日本語）よりも第一言語でリスニングをした場合（実験参加者 A、B にとっての日本語、実験参加者 C にとっての英語）の方が、脳血流は、左脳計測部位の範囲の中で、より直接的に言語関連領域と見られる部位に、比較的集中していることが観測できた。
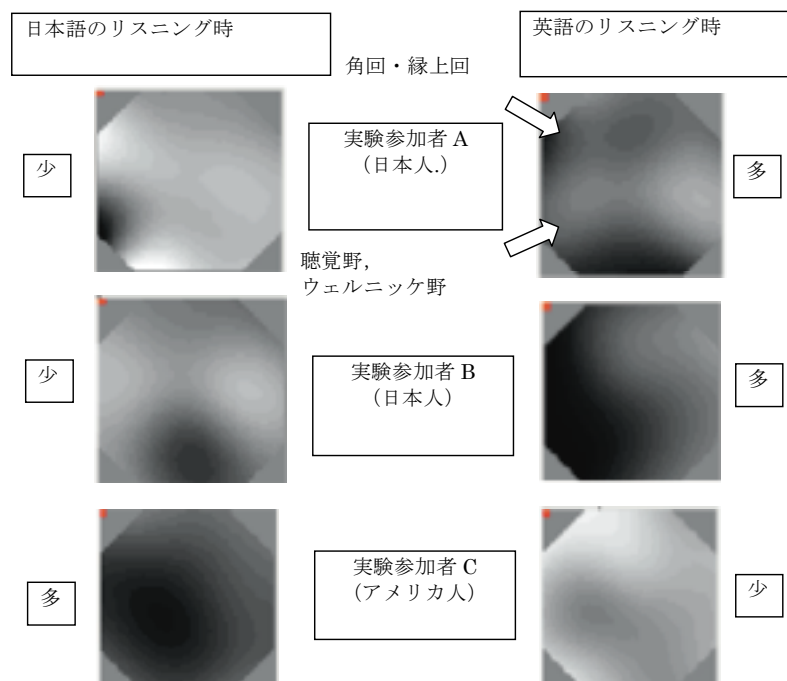
図2. 左脳言語野周辺計測部位の光トポグラフィ画像

注）：課題開始 15 秒後、白黒濃淡は血流量増加の度合いを示し、黒が高い増加を示す。

多 ：血流増加量多い　　少 ：血増加量少ない

3.3. 考察

インタビュー結果と脳血流増加量から総合的に考察した結果を記す。

(1) 実験参加者 A は、中学から英語を学び始め、現在、 英語を使用する職業に従事している。脳血流の増加量は、第一言語の日本語課題を遂行しているときよりも第二言語の英語課題を遂行しているときの方が多かった。インタビューでは、「英語の課題の内容は（背景知識として）知っていたが、日本語の課題の内容は、知らなかった。」と回答をしている。このことから、背景知識があっても第二言語課題の方が、背景知識がない第一言語課題より多くの注意を向ける必要があることが示唆された。

(2) 実験参加者 B は、中学から英語を学び始めた英文学専攻の大学生である。実験参加者 A と同様に、脳血流の増加量は、第一言語の日本語課題を遂行しているときより、第二言語の英語課題を遂行しているときの方が多かった。インタビューでは、「どちらのニュースの内容についても背景知識として知っていたが、英語を聞いているときの方が集中をしていた。英語のニュースの内容の方が興味があった。」と回答をしている。インタビューから、実験参加者 A にとって、どちらの課題についても、背景知識を有していたことが確認できた。このケースの場合、内容への興味・関心の度合いという要素も含まれてくるので、その点にも留意する必要はあるが、一応、両課題において背景知識のある内容でも、第一言語の課題より第二言語の課題の方が多くの注意を向ける必要があることが示唆された。

(3) 実験参加者 C は、在日15年の日系アメリカ人である。脳血流の増加量は、第一言語の英語課題を遂行しているときより第二言語の日本語課題を遂行しているときの方が多かった。インタビューでは、「日常的な日本語の会話は理解ができるが、ニュースを理解することは、難しい。」「英語の課題の内容は知っていたが、日本語の課題の内容は知らなかった。」と回答している。このことから、有る意味当然と思われるが、背景知識がある第一言語の課題より、背景知識のない第二言語の課題の方がより多くの注意を向ける必要があることが示唆された。

4.　おわりに

本研究では、基本的課題として、人間の言語情報処理において、第一言語と第二言語とを比較した場合、どちらが、脳内の注意量がより多く必要であるのかという問題を、背景知識の影響も考慮して、検証した。先行研究に基づく仮説として、（背景知識が同じであるならば）学習者にとって、第一言語での理解に比べ第二言語での理解の方が、言語情報について、基本的情報処理が自動化されている度合いが低く、その分、第一言語より第二言語の方がより多くの注意量が必要であると想定された。このような仮説を検証するため、生理学の分野における研究で、注意量と脳血流量が正の相関関係があると報告されていることにも依拠して、本稿では、第一言語と第二言語を処理するときの脳活性状態の違いを測定し、それにより注意量の違いを調査した。

実験では、日本人英語学習者2名、アメリカ人日本語学習者1名のそれぞれに第一言語と第二言語でリスニング課題を提示した。各課題遂行中の脳活性状態は、光トポグラフィを使用して脳血流の相対的変化量で判断した。また、インタビュー結果から、提示課題の内容についての背景知識の有無を調査した。

結果は、いずれの学習者も第一言語より第二言語の課題遂行時の方が脳血流の増加量が多かった。すなわち、第一言語課題遂行時の方が、第二言語課題遂行時より高い脳活性度を要求されたと解釈できる。また、背景知識に関するインタビュー結果と照合すると、本実験においては背景知識のない第一言語課題遂行時より、背景知識があっても第二言語課題遂行時の方が高い脳活性度を示し、多くの注意量が要求されることが示唆された。さらに、第一言語の課題遂行時には、相対的に、言語野に集中した形で血流増加の割合が多いことが示され、この点から、第一言語では第二言語と比較して、より選択的に、言語活動に注意が向いていることが示唆された。

現在、第二言語習得や英語教育の分野において、言語課題を遂行するとき、注意や意識を効率的に活性化させるには、どのような教材を使用し、どのような教授法が効果的なのかが注目されている。本研究結果が、今後、最適な難易度の教材、効率的な英語教授法の開発を試みる際にも、参考になれば幸いである。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究 B （平成16-18年度 課題番号16300269、研究代表者：木下徹）（平成18-20年度 基盤研究 C、課題番号18500739、研究代表者：大石晴美）の助成を受けた。この場を借りて感謝の意を表したい。

参考文献

Carrell, P. L. (1983). Three components of background knowledge in reading comprehension. *Language Learning, 33,* 183-207.

Crinion, J., Turner, R., Grogan, A., Hanakawa, T., Noppeney, U., Devlin, J. T., ASO, T., Urayama, S., Fukuyama,H., Stockton, K., Usui, K., Green, D.W., and Price, C. J. (2006). Language control in the bilingual brain. *Science*, *312*:1537-1540

Illes, J., Francis, W.S., Desmond, J.E., Gabrieli, J.D.E., Glover, G.H, Poldrack, R., Lee, C.J., and Wagner, A.D. (1999). Convergent cortical representation of semantic processing in bilinguals, *Brain and Language,* 70, 3, 347-363.

岩本隆茂・川俣甲子夫（1990）『シングル・ケース研究法：新しい実験計画法とその応用』、勁草書房

Jacobs, B., and Schumann, J. H,. (1992). Language acquisition and the neurosciences: Toward a more integrative perspective, *Applied Linguistics* 13, 282-301.

小泉英明(2000) 光トポグラフィーが拓く21世紀の脳機能研究—トランスディシプリナリな研究へのアプローチ—『脳の科学』22, 12, 1243-1254. 星和書店

McLaughlin, B., Rossman, T., and McLeod, B. (1983). Second language learning: An information-processing perspective. *Language Learning, 33*, 135-158.

大石晴美(2006).『脳科学からの第二言語習得論』 昭和堂

Perani, D. and Abutalebi, J. (2005) The neural basis of first and second language processing. *Current Opinion in Neurobiology*, 15, 2, 202-206.

Perani, D., Abutalebi, J., Paulesu, E., Brambati, S., Scifo, P., Cappa, S.F., and Fazio, F. (2003). The role of age of acquisition and language usage in early, high-proficient byilinguals: An fMRI study during verbal fluency. *Human Brain Mapping,* 19,3, 170-182.

Posner, M. I., and Carr, T. H. (1992). Lexical access and the brain: Anatomical constraints on cognitive models of word recognition. *American Journal of Psychology*, 105, 1-26.

Rumelhart, D. E. (1980). Schemata: the building blocks of cognition, in R. J. Spiro, B. C. Bruce, and W. F. Brewer (eds.) *Theoretical Issues in Reading Comprehension,* Hillsdale, N. J.: Erlbaum.

酒井邦嘉(2002). 『言語の脳科学』中公新書

酒井邦嘉(2006). 脳機能マッピングによる言語処理機構の解明. 『生体の科学』57, 30-36.

Schumann, J. H., Crowell, S. E., Jones, N. E., Lee, N., Schuchert, S. A., & Wood, L. A. (2004). *The Neurobiology of Learning*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Effects of Nicotine 75 Associates, Inc.

Simard, D. and Wong W. (2001). Alterness, orientation, and detection: The conceptualization of attentional functions in SLA. *Studies in Second Language Acquisition, 23*, 103-124.